

УДК 520.626/627

## ФОТОПРИЕМНОЕ УСТРОЙСТВО НА БАЗЕ 16-ЭЛЕКТРОДНОГО КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА ВЫСОКОГО ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

© 2020 В. Л. Плохотниченко<sup>1\*</sup>, Г. М. Beskin<sup>1,2</sup>, S. V. Karpov<sup>1,2,3</sup>,  
А. В. Солин<sup>4</sup>, А. А. Солин<sup>4</sup>, А. С. Терехов<sup>5</sup>, С. Н. Косолюбов<sup>5</sup>, Г. Э. Шайблер<sup>5</sup>,  
В. Г. де-Бур<sup>6</sup>, С. В. Моисеев<sup>1</sup>, В. В. Павлова<sup>1</sup>, С. С. Моисеев<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

<sup>3</sup> Институт физики Чешской академии наук, Прага, 18221 Чехия

<sup>4</sup> Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск, 220030 Беларусь

<sup>5</sup> Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090 Россия

<sup>6</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021 Россия

<sup>7</sup> ИП Моисеев, Таганрог, 347900 Россия

Поступила в редакцию 28 августа 2019 года; после доработки 25 октября 2019 года;  
принята к публикации 25 октября 2019 года

В работе описывается создание фотоприемного устройства на базе координатно-чувствительного детектора с арсенид-галлиевым катодом и 16-элементным анодом. При квадрантном включении (объединении электродов по четыре) его рабочее поле было ограничено 10 мм (при размере фотокатода 18 мм). Реализация в фотоприемном устройстве схемы аналогового кодирования координат центров электронных лавин, поступающих на анод, позволила увеличить диаметр поля до 14 мм и добиться пространственного разрешения в 50 мкм. Созданное фотоприемное устройство используется как основной компонент многомодового панорамного фотополяриметра в наблюдениях с микросекундным временным разрешением на 6-м телескопе САО РАН. Приводятся некоторые результаты, полученные в ходе этих работ.

Ключевые слова: *методики: фотометрическая — методики: спектроскопическая — методики: поляриметрическая*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей характеристикой переменных астрофизических источников излучения являются закономерности вариаций их интенсивности. Исследования такого рода в последнее время существенно расширились и обрели специальное наименование *Time Domain Astronomy* («астрономия во временной области») <sup>1</sup>. В их рамках особое и важное место занимает изучение астрономических объектов с высоким временным разрешением (Phelan et al. 2008, Shearer et al. 2008). При решении таких задач в наблюдениях необходимо регистрировать отдельные фотоны, получая об их совокупности максимум информации: спектральной, фотометрической, поляри-

зационной. В качестве детекторов оптического излучения ранее использовались одноканальные фотоэлектронные умножители (ФЭУ) (Hiltner 1962). Со временем к ним добавились матричные ФЭУ, лавино-пролетные диоды (avalanche photo diode (APD)) (Eikenberry et al. 1996), приемники на основе эффектов сверхпроводимости, на основе сверхпроводящего туннельного перехода (superconducting tunnel junction (STJ)) и сверхпроводящего болометра (transition-edge sensor (TES)) (Pergaman et al. 1999, Romani et al. 2001). Общим недостатком этих приборов является малое количество пространственных элементов разрешения (от 1 до 1000), что препятствует повышению предела обнаружения при регистрации изображений объектов (а не общего потока их излучения), а также синхронным наблюдениям в разных диапазонах частот и/или с различной ориентацией плос-

\*E-mail: pvl@sao.ru

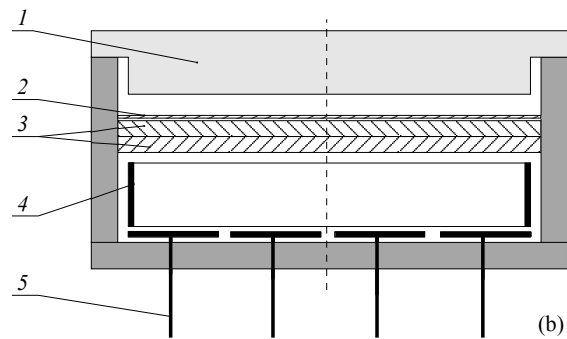
<sup>1</sup><http://www.timedomainastronomy.net/>

кости поляризации. Отметим, что ПЗС-матрицы, являющиеся наиболее эффективными современными детекторами, имеющими большое число пространственных каналов регистрации (вплоть до миллиардов в решетках ПЗС (Harbeck et al. 2014)), плохо приспособлены для регистрации отдельных фотонов (Plokhotnichenko et al. 2009a). Даже у скоростных версий EMCCD при предельном биннинге и преобразовании поля временное разрешение не лучше  $1 \text{ мс}^2$ .

Мы сопоставили наборы характеристик различных типов оптических детекторов (Debur et al. 2009) и показали, что оптимальными приборами для изучения быстрой оптической переменности (на временной шкале вплоть до микросекунд) являются фотоприемные устройства (ФПУ) на базе координатно-чувствительных детекторов (КЧД) с усилением фототока микроканальными пластинами (МКП). На их выходе зарегистрированным фотоном соответствуют импульсы тока длительностью, не превышающей десятки наносекунд, что во много раз меньше интервала между ними. Последнее условие автоматически выполняется практически для всех астрофизических объектов при наблюдениях на крупных телескопах (их интенсивности не превышают  $10^6$  отсчет/с). Амплитуды этих импульсов, соответствующие координатам фотонов, кодируются с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП), и последовательность кодов передается в систему регистрации, где определяется время прихода фотонов.

В рамках эксперимента МАНИЯ по поиску и исследованию быстропеременных источников оптического излучения (Beskin et al. 1999, Plokhotnichenko et al. 2003; 1999) с 1998 г. в наблюдениях на телескопах САО РАН используются ФПУ, оснащенные КЧД с мультищелочными фотокатодами с клинополосным (Beskin et al. 1999), а затем и квадрантными коллекторами (Debur et al. 2003). Опыт их эксплуатации позволил сформулировать требования к новому поколению этих приборов с повышенной чувствительностью, большей площадью и улучшенным пространственным разрешением. Такой КЧД-16 был создан в Институте физики полупроводников СО РАН в 2006 г. (Beskin et al. 2008, de-Bur et al. 2008, Debur et al. 2009, Plokhotnichenko et al. 2018) и является бипланаром (состоит из двух МКП) с фотокатодом из арсенида галлия (GaAs) и 16-элементным коллектором (рис. 1).

В то же время размерность кодов, соответствующих координатам приходящих фотонов, в используемой нами системе регистра-

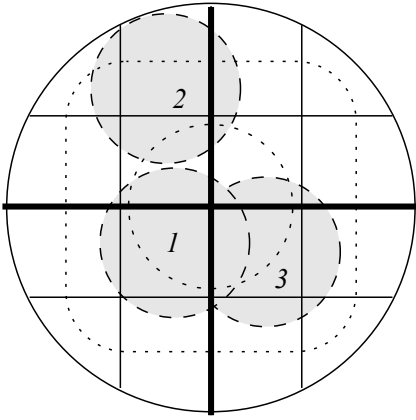


**Рис. 1.** КЧД с GaAs-катодом и 16-элементным коллектором: (а) — общий вид прибора; (б) — его схема в разрезе: 1 — входное окно с напыленным снизу катодом, 2 — защитная пленка, 3 — микроканальные пластины, 4 — ускорительное кольцо, 5 — электроды коллектора с игольчатыми контактами.

ции «Квантохрон 4-48» ограничена 48 разрядами (Plokhotnichenko et al. 2009b). Это обстоятельство обусловило начальное использование КЧД с квадрантной конфигурацией анода при объединении элементов коллектора в четыре группы по четыре электрода (Beskin et al. 2008, Debur et al. 2009) и обработкой данных, аналогичной описанной в работе Debur et al. (2003). При этом рабочее поле неизбежно уменьшилось до 10 мм из-за невозможности измерять координаты центроидов зарядов лавин, которые не попадают в центр рабочего поля (см. рис. 2).

В настоящей работе мы описываем аппаратную реализацию метода аналогового кодирования положения центров лавин (Aibund et al. 1984), которая позволила использовать при регистрации все 16 электродов, тем самым увеличив размер рабочего поля детектора и улучшив его пространственное разрешение. В разделе 2 описан принцип аналогового кодирования, в разделе 3 — его схемная реализация, в разделе 4 описан рабочий экземпляр детектора в оснастке, в разделе 5 приводятся результаты тестирования прибора, в Заключение обсуждаются некоторые астрофизические результаты, полученные с помощью КЧД-16.

<sup>2</sup><http://www.andor.oxinst/products/ixon-emccd-camera>



**Рис. 2.** Структура коллектора при квадрантном включении. Жирными линиями выделены четыре группы электродов, выходные контакты которых объединены и подключены к измерительным цепям. Координаты центроидов измеримы только при попадании центра рабочего поля в область лавины, поэтому центроиды лавин 2 и 3 невозможно определить.

## 2. АНАЛОГОВОЕ КОДИРОВАНИЕ КООРДИНАТ ЦЕНТРОИДОВ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАВИН

Для перехода к 16-элементной конфигурации коллектора без изменения характеристик системы регистрации мы реализовали метод аналогового кодирования центроидов электронных лавин, подобный описанному в работах Aibund et al. (1984), Anger (1958), Gruntman (1984) (см. также [http://sens1.com/downloads/ds/TN-Readout\\_Methods\\_for\\_Arrays\\_of\\_SiPM.pdf](http://sens1.com/downloads/ds/TN-Readout_Methods_for_Arrays_of_SiPM.pdf)), что позволило, используя лишь три АЦП, формирующие 36-разрядный код, увеличить диаметр рабочего поля детектора до 14 мм и обеспечить пространственное разрешение, необходимое для наблюдений на 6-м телескопе (Plohotnichenko et al. 2010; 2009c). Ниже приводится описание этого метода и принципиальная схема его реализации в нашем ФПУ.

Легко видеть, что координаты  $X, Y$  центроидов лавин при непрерывном распределении их зарядов на аноде можно найти из выражений:

$$x = \frac{\iint_c x\rho(x, y)dxdy}{\iint_c \rho(x, y)dxdy},$$

$$y = \frac{\iint_c y\rho(x, y)dxdy}{\iint_c \rho(x, y)dxdy},$$
(1)

где  $x, y$  — координаты в плоскости коллектора,  $\rho(x, y)$  — плотность заряда,  $X, Y$  — координаты центроида лавины,  $c$  — площадь коллектора, при этом начало координат расположено в его центре.

Для 16-элементного анода они принимают дискретную форму:

$$x = \frac{\sum_i \sum_j x_{ij}q_{ij}}{\sum_i \sum_j q_{ij}},$$

$$y = \frac{\sum_i \sum_j y_{ij}q_{ij}}{\sum_i \sum_j q_{ij}},$$
(2)

где  $x_{ij}, y_{ij}$  — дискретные координаты элемента  $\{i, j\}$  ( $i, j = -2, \dots, +2$ ),  $q_{ij}$  — заряд элемента  $\{i, j\}$ .

Зарядам, попадающим на отдельные элементы коллектора  $\{i, j\}$ , соответствуют амплитуды импульсов напряжения обеих полярностей на выходе зарядочувствительных усилителей ЗЧУ ( $CSA_{ij}$ ), которыми они снабжены (рис. 3). Импульсы каждой полярности подаются на три резистора с номиналами  $R_{ij}^x, R_{ij}^y, R$  и создают в них токи  $I_{ij}^x, I_{ij}^y, I_{ij}$ , согласно соотношениям

$$I_{ij}^x = \frac{\Delta U_{ij}}{R_{ij}^x} = \frac{kq_{ij}}{R_{ij}^x},$$
(3)

$$I_{ij}^y = \frac{\Delta U_{ij}}{R_{ij}^y} = \frac{kq_{ij}}{R_{ij}^y},$$

$$I_{ij} = \frac{\Delta U_{ij}}{R} = \frac{kq_{ij}}{R},$$
(4)

где  $\Delta U_{ij}$  — амплитуда импульса напряжения, соответствующая заряду  $q_{ij}$ , ( $k$  — коэффициент пропорциональности).

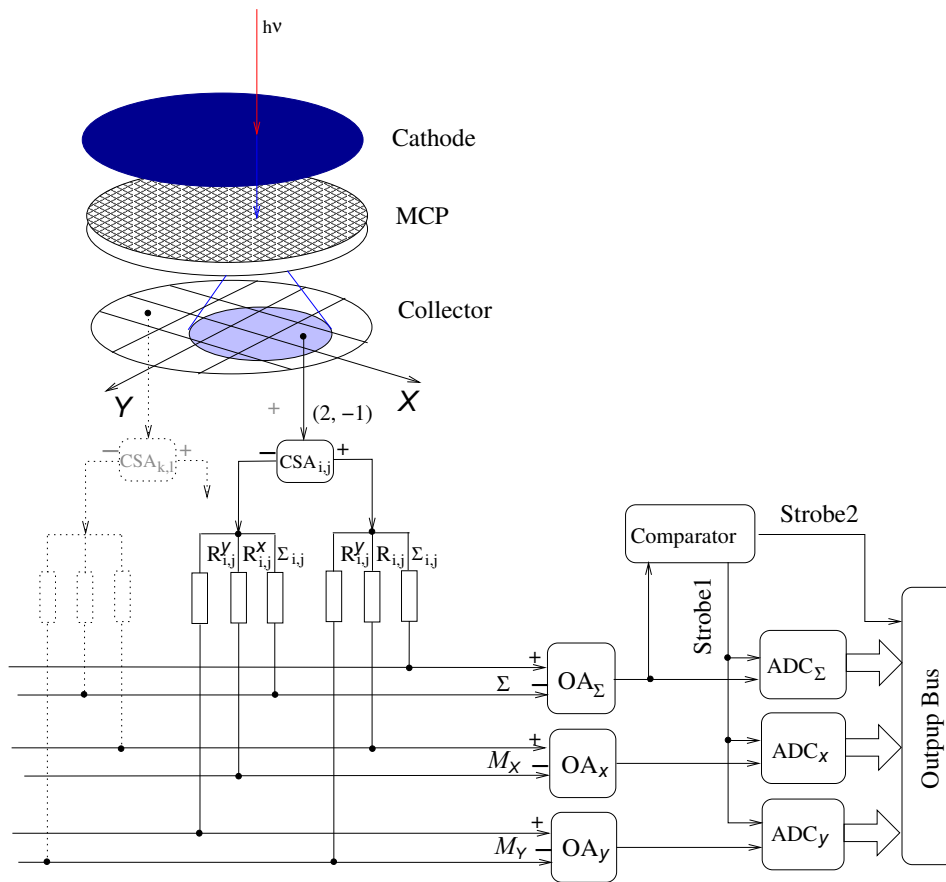
Выбирая номиналы сопротивлений в виде  $R_{ij}^x = \frac{A}{|x_{ij}|}$ ,  $R_{ij}^y = \frac{A}{|y_{ij}|}$  и  $R = \text{const}$ , имеем вместо выражения (3):

$$I_{ij}^x = \frac{k}{A} |x_{ij}| q_{ij},$$
(5)

$$I_{ij}^y = \frac{k}{A} |y_{ij}| q_{ij},$$
(6)

где  $A$  — калибровочный множитель.

Таким образом, силы токов из уравнения (3) на выходах резисторов  $R_{ij}^x$  и  $R_{ij}^y$  пропорциональны как зарядам на элементах коллектора, так и их координатам, кодируя тем самым последние. Ток на



**Рис. 3.** Принципиальная схема аналогового кодирования центроидов лавин. Здесь:  $\Sigma$  — знаменатель в формуле (2), а  $M_x$  и  $M_y$  — числители.

выходе резистора  $R$  пропорционален лишь заряду на элементе коллектора. Выходы всех резисторов соединены с магистралями  $X, Y, \Sigma$ , ведущими к соответствующим операционным усилителям (ОУ) (ОА на рис. 3), на входах которых все токи суммируются. Их знаки, а следовательно, знаки координат  $x_{ij}$  и  $y_{ij}$  в формуле (5), определяются деталями коммуникаций двух одинаковых групп резисторов, соединенных с положительными и отрицательными выходами зарядочувствительных усилителей. Для элементов коллектора с положительными значениями координат положительные выходы резисторов соединяются (через магистраль) с прямыми входами ОУ, а отрицательные — с инвертирующими. При этом оба соответствующих тока из выражения (5) входят в их сумму со знаком «+». Для элементов же с отрицательными значениями координат положительные выходы резисторов соединяются с инвертирующими входами ОУ, а отрицательные — с прямыми, при этом, разумеется, эти токи входят в сумму с отрицательными знаками. Выходы же резистора  $R$  соединяются со входами ОУ той же полярности.

В итоге на выходах операционных усилителей

$OA_x, OA_y$  и  $OA_\Sigma$  формируются сигналы, позволяющие определить координаты центроидов лавин, а именно:

$$I_x = \frac{k}{M} \sum_i \sum_j x_{ij} q_{ij}, \tag{7}$$

$$I_y = \frac{k}{M} \sum_i \sum_j y_{ij} q_{ij},$$

$$I_\Sigma = \frac{k}{M} \sum_i \sum_j q_{ij}. \tag{8}$$

Эти сигналы оцифровываются тремя АЦП, запускаемыми стробами в моменты максимумов амплитуд суммарных зарядов, и поступают на выходную шину (Output Bus, рис. 3), откуда принимаются для дальнейшей обработки системой регистрации «Квантохрон 4-48» (Plokhotnichenko et al. 2009b). Последняя определяет момент прихода лавины на коллектор КЧД и сохраняет итоговый 64-разрядный код в буферной памяти, откуда он поступает в компьютер сбора информации.

Координаты центроидов  $X, Y$  определяются при компьютерной обработке полученных данных, согласно выражению (2), с использованием формулы (7):

$$\begin{aligned} X &= \frac{M I_x}{R I_\Sigma}, \\ Y &= \frac{M I_y}{R I_\Sigma}. \end{aligned} \quad (9)$$

С помощью компьютерного моделирования были подобраны номиналы  $R_{ij}^x, R_{ij}^y, R$  и значения нормировочного множителя  $M$  (оно входит в программу обработки данных). Таким образом,  $R_{ij}^{x,y} = 3$  кОм при  $|i|, |j| = 1$  и  $R_{ij}^{x,y} = 1$  кОм при  $|i|, |j| = 2$ , а  $R = 1.5$  кОм.

Детальная схема резистивной матрицы, обеспечивающей аналоговое кодирование координат центроидов лавин, приводится в Приложении, а принцип ее работы поясняет рис. 3. Для реализации стабильного и эффективного ее функционирования параметры всех усилителей выравнивались при юстировке в лабораторных условиях с точностью 1%.

### 3. СТРУКТУРА И КОМПОНЕНТЫ ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА (ФПУ) НА БАЗЕ КЧД

С использованием координатного детектора в 16-элементной конфигурации было сконструировано фотоприемное устройство (ФПУ), где реализованы вышеописанные принципы регистрации потоков фотонов. В его состав входят следующие основные элементы (рис. 4):

- блок КЧД с защитным окном и холодильниками с элементами Пельтье;
- делитель высокого напряжения (HVS) на электродах КЧД;
- блок зарядочувствительных усилителей (ЗЧУ);
- резистивная матрица, обеспечивающая аналоговое кодирование координат центроидов электронных лавин, приходящих на коллектор КЧД (см. раздел 2);
- блок операционных усилителей и аналого-цифровых преобразователей;
- компаратор, запускающий аналого-цифровые преобразователи (Comp).

Зарядочувствительные усилители (ЗЧУ) изготовлены в виде отдельных плат с боковыми разъемами, позволяющими устанавливать их на кросс-плате с цанговыми разъемами. На этой же кросс-плате собрана резистивная матрица из низкоомных резисторов по симметричной парафазной схеме. Внешний вид одного из усилителей показан на рис. 6. Пример реальных сигналов на выходе ЗЧУ приведен на рис. 7. Блок операционных усилителей, АЦП и компаратора показан на рис. 8.

Отдельные боксы ФПУ (см. рис. 4) заэкранированы для защиты в первую очередь от наводок со стороны делителя напряжения. Общий вид ФПУ приведен на рис. 9.

### 4. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ФПУ

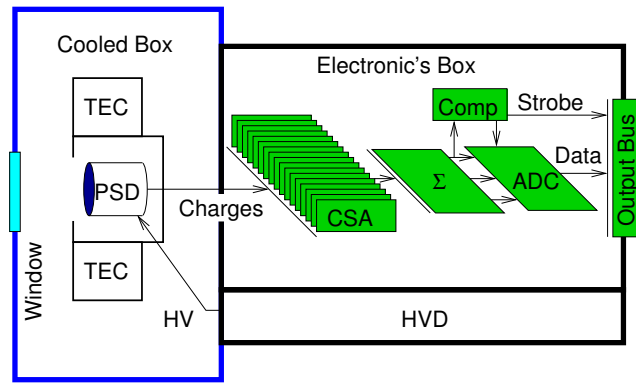
Зарядочувствительные усилители, основанные на специально разработанных микросхемах (Dvornikov 2005, Dvornikov et al. 1997), состоят из двух секций. В первой секции входной импульс тока (заряд с коллектора) наносекундной длительности преобразуется в импульс напряжения с длительностью заднего фронта около 2.5 мкс. Во второй секции импульсы укорачиваются до 0.25 мкс и усиливаются по амплитуде. Коэффициент преобразования составляет  $10 \text{ мВ фКл}^{-1}$ .

Аналоговое кодирование, основанное на суммировании биполярных сигналов с выходов различных ЗЧУ, осуществляется специально сконструированной резистивной матрицей (см. раздел 2).

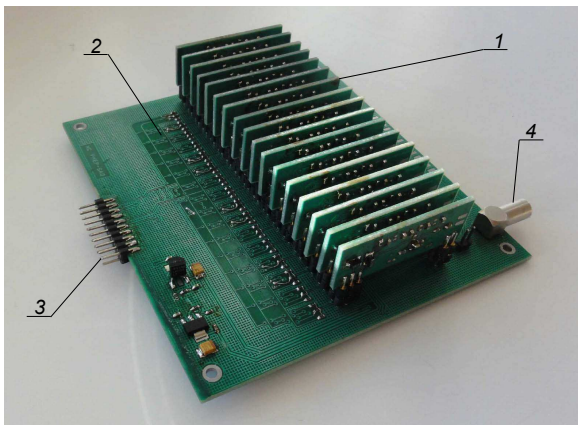
На следующей стадии обработки биполярные сигналы с выхода резистивной матрицы усиливаются, масштабируются и преобразуются в однополярную форму с помощью операционных усилителей ОРА2365.

Для оцифровки амплитуд импульсов, сформированных операционными усилителями, используются 12-разрядные АЦП типа ADS7881. Диапазон амплитуд входных сигналов составляет 2.5 В, что дает точность кодирования (младший разряд АЦП) около 0.61 мВ. Среднеквадратичный шум равен  $-1.7$  мВ, что соответствует 10–11 битам АЦП.

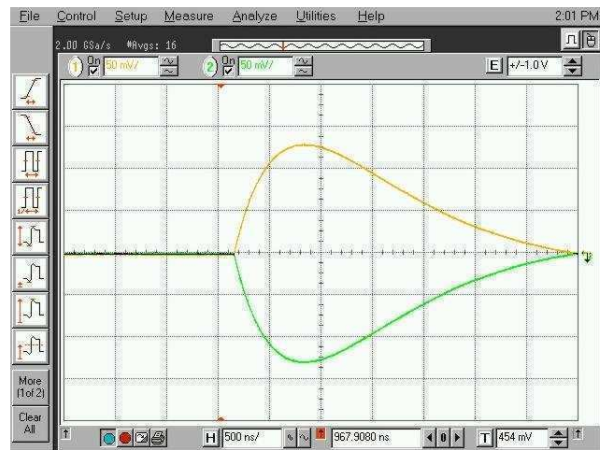
Высокочувствительный быстродействующий компаратор, разработанный и изготовленный в Национальном центре физики частиц высоких энергий (Минск) (ныне Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета), описанный в статье Debug and Solin (2002), формирует импульсы запуска АЦП, его вход подключен к сумматору выходных импульсов. Исследования показали, что неопределенность срабатывания компаратора зависит от амплитуды



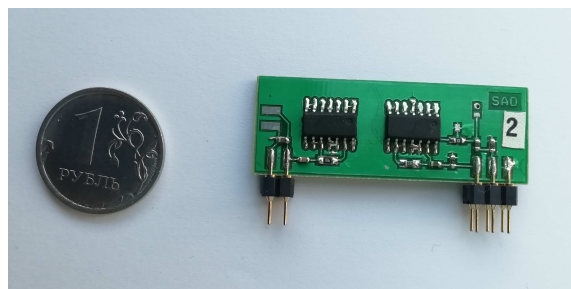
**Рис. 4.** Блок-схема фотоприемного устройства. Cooled Box — охлаждаемый отсек, Window — защитное стеклянное окно, PSD — координатно-чувствительный детектор, TEC — термоэлектрические холодильники, Electronic's Box — отсек усилителей и АЦП, CSA — зарядочувствительные усилители,  $\Sigma$  — резистивная матрица, ADC — плата операционных усилителей и аналого цифровых преобразователей, Comp — компаратор, узел выработки сигналов управления АЦП и строба сопровождения данных (Data), Output Bus — формирователи выходных сигналов и разъем, HVD — делитель высокого напряжения.



**Рис. 5.** Кросс-плата с зарядочувствительными усилителями и резистивной матрицей: 1 — линейка усилителей, 2 — резистивная матрица, 3 — разъем выходных сигналов, 4 — разъем для тестового сигнала.



**Рис. 7.** Форма биполярных сигналов на выходе ЗЧУ.



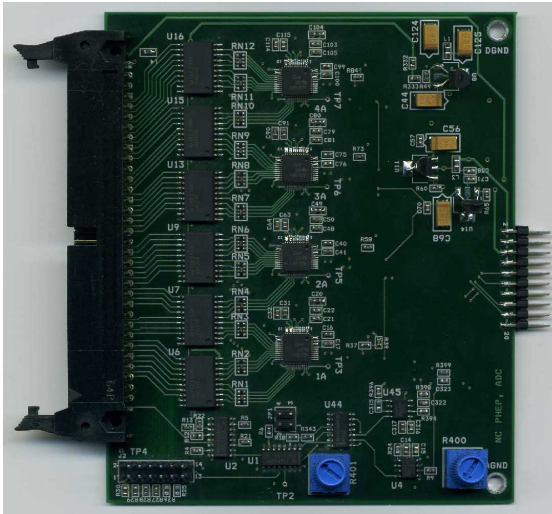
**Рис. 6.** Зарядочувствительный усилитель. На левый игольчатый разъем подается сигнал с коллектора, на правый — питание и выходной биполярный сигнал.

описаны в работах Debur et al. (2003; 2009), Plokhotnichenko et al. (2018). Сформированные АЦП коды через шинные формирователи 74LS245 вместе с сопровождающими стробами поступают на выходной разъем для передачи в систему сбора (Plokhotnichenko et al. 2009b).

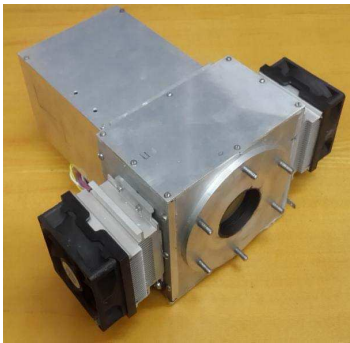
### 5. ТЕСТИРОВАНИЕ ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА

При наладке ФПУ проверки и настройки электроники проводились с использованием т.н. электронной точки, которая формировалась на выходе каждого зарядочувствительного усилителя при поступлении на его вход через монтажную емкость самой платы порядка 1 пФ сигналов от генератора. С амплитудой 10 мВ они поступали через коаксиальный разъем на кросс-плату ЗЧУ (рис. 5) и

регистрируемого импульса и составляет не более 30 нс, что вполне достаточно для определения моментов регистрации фотонов. Работа усилителей, АЦП, а также техника получения данных подробно



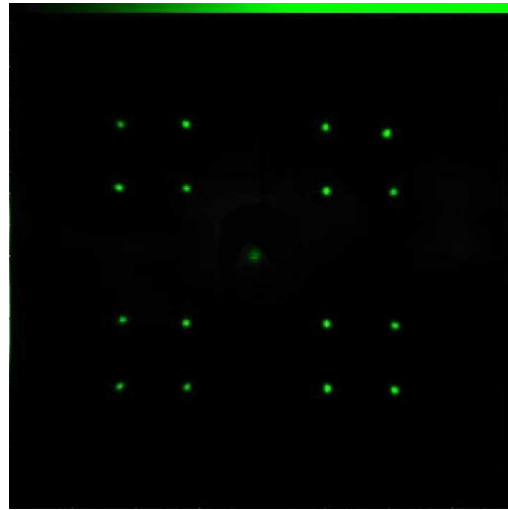
**Рис. 8.** Блок операционных усилителей, АЦП и компаратора. Справа — разъем для соединения с кросс-платой ЗЧУ, слева — разъем для подключения к системе регистрации.



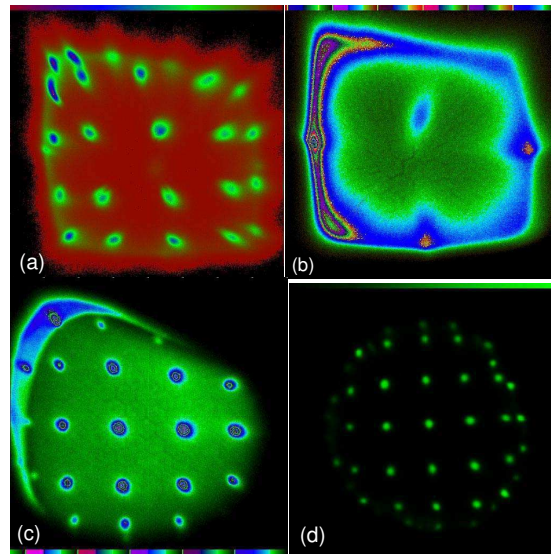
**Рис. 9.** Общий вид ФПУ со стороны входного окна. Выступающие резьбовые шпильки служат для крепления к фланцу фотометра.

формировали точечное пятно в центре поля, показанного на рис. 10. Для проверки работы отдельных усилителей мы поочередно подключаем их к цепи сигнала от генератора через дополнительный конденсатор емкостью 1 пФ. И на этом же рисунке показаны еще 16 электронных точек, сформированные такими подключениями. Некоторая асимметрия в их расположении обусловлена различиями характеристик ЗЧУ и монтажных емкостей, существующих между проводниками кросс-платы. Размер точек близок к 30 мкм, что характеризует пространственное разрешение КЧД, обусловленное электроникой самого ФПУ.

Эффективность коррекции неоднородности чувствительности рабочего поля при его равномерной засветке определялась для КЧД как в квадрантном, так и в 16-элементном включении. При тестировании использовалась диафрагма с набором круглых отверстий диаметром 0.4 мм и



**Рис. 10.** Электронные точки, соответствующие по амплитуде входного напряжения на ЗЧУ сигналу с КЧД.



**Рис. 11.** Изображения точечных источников и фоновая засветка, полученные с разными конфигурациями КЧД: (а) — точечная диафрагма с КЧД в квадрантном включении; (б) — фоновая засветка поля КЧД с квадрантным включением; (с) — с тем же КЧД в 16-элементном включении; (д) — изображение диафрагмы, полученное на другом КЧД при 16-элементном включении, размер его рабочего поля около 14 мм, расстояние между точками диаметром 0.4 мм составляет 2.1 мм.

шагом 2.1 мм (результаты приведены на рис. 11). При обоих включениях просматриваются неоднородности гексагональной формы, отражающие структуру первой МКП, пространственное разрешение составляет около 50 мкм, а размер поля возрастает с 10 мм до 14 мм в 16-элементной схеме.

На рис. 12 продемонстрирована высокая степень однородности поля КЧД как в режиме тем-

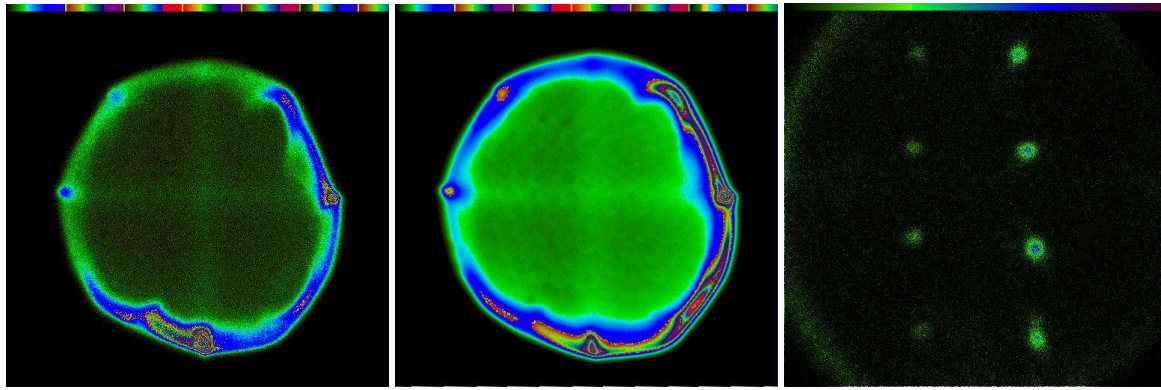


Рис. 12. Различные изображения, полученные с 16-электродным КЧД (пояснения в тексте).

Таблица 1. Скорости счета в зависимости от интенсивности точечного источника излучения диаметром 1'' в масштабе первичного фокуса БТА

Пропускание потока	3%	6%	12%	24%	50%	100%
Скорость счета	100	200	400	800	1200	1400
Ослабление потока	1	1	1	1	0.75	0.44

нового тока (левая панель), так и при равномерной засветке (средняя панель). Там же (правая панель) — изображение реального объекта при наблюдениях с многомодовым панорамным фотополяриметром (МРПП) в полосах фильтров  $V$  и  $R$  при подаче тестовых потоков через двойную призму Волластона в четырех ориентациях плоскости поляризации.

Координатно-чувствительные детекторы с МКП относятся к приемникам с узким динамическим диапазоном (Gruntman 1984). Для его определения у КЧД с арсенид-галлиевым фотокатодом мы исследовали характер зависимости интенсивности потока зарегистрированных фотоотсчетов от интенсивности исходного потока излучения. Результаты, полученные при изменениях пропускания дырчатой диафрагмы МРПП (Plokhotnichenko et al. 2020), приведены в таблице 1 и на рис. 13а.

Легко видеть, что эта зависимость становится нелинейной уже при возрастании интенсивности излучения в десять раз. Поскольку физическая природа такого эффекта связана с падением локальной плотности свободных электронов в первой МКП при высоком уровне локальной освещенности (Gruntman 1984), степень нелинейности будет зависеть от размера изображения источника света. Таблица 2 и рис. 13б демонстрируют эту связь.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. НЕКОТОРЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Как уже отмечалось, ФПУ с GaAs-КЧД включено в состав МРПП для первичного фокуса

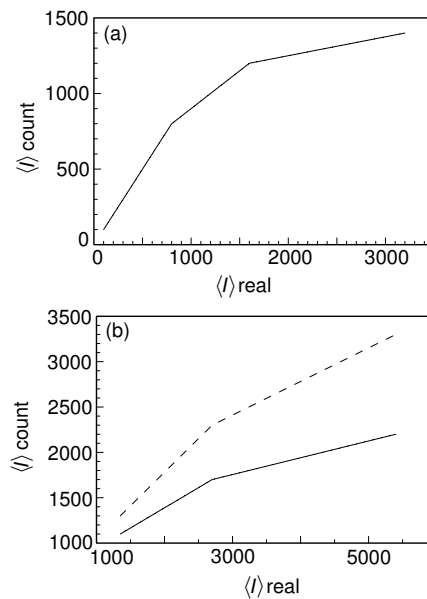


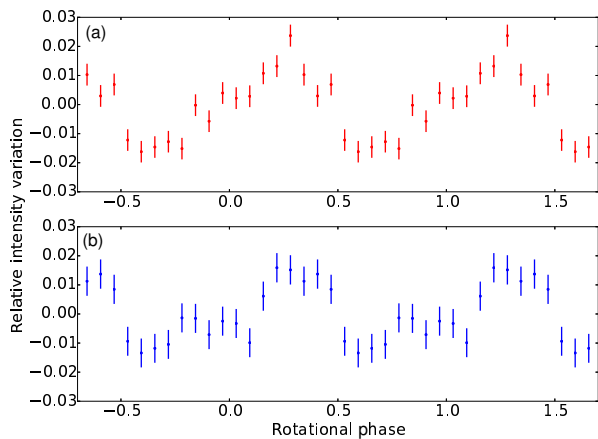
Рис. 13. (а) — зависимость интенсивности отсчетов от интенсивности засветки: по горизонтальной оси — реальный поток от звезды, по вертикальной — измеренный с ФПУ. (б) — то же для сфокусированного (порядка 1'', сплошная линия) и расфокусированного (порядка 2'', пунктирная линия) изображений. По горизонтальной оси — подаваемая интенсивность (в пересчете по раскрытию потока), по вертикальной — измеренная на ФПУ.

Таблица 2. Нелинейность потоков фотоотсчетов разных интенсивностей при изменении размеров изображения

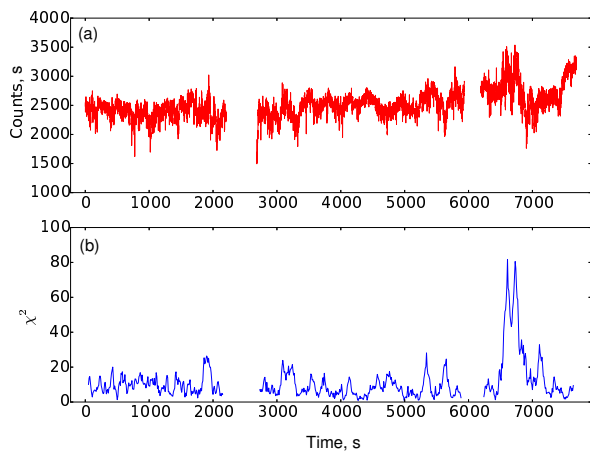
Расфокусированное изображение	1300	2300	3300
Сфокусированное изображение	1100	1700	2200

БТА (Plokhotnichenko et al. 2003; 2010; 2009c). С ним ведутся программные наблюдения, в ходе которых получены уникальные результаты (Shibanov et al. 2017). На рис. 14 показаны свернутые кривые блеска в долях от средней интенсивности потоков





**Рис. 14.** Относительные вариации интенсивности излучения в красном (a) и синем (b) диапазонах при свертке с периодом пульсара после орбитальной коррекции в одном из интервалов наблюдений.



**Рис. 15.** Значимость пульсаций в различных частях кривой блеска, выраженная как величина  $\chi^2$ , при свертке с заданным периодом. Малые значения соответствуют отсутствию значимой структуры в свертке, большие — ее наличию. Видно, что периодические пульсации значимо зарегистрированы лишь в интервале наблюдений с 6600-й по 7000-ю секунды.

квантов пульсара PSR J1023+007 с периодом 1.7 мс в красном и синем диапазонах. А на рис. 15 приведена верификация наблюдаемого профиля кривых блеска с помощью критерия  $\chi^2$ . Амплитуда пульсаций при этом оказывается около 1–2% как в красном, так и в синем диапазонах, при этом форма пульса практически синусоидальная, в отличие от особенностей пульсаций, обнаруженных ранее (Ambrosino et al. 2017).

## 7. ВЫВОДЫ

Созданное фотоприемное устройство на базе координатно-чувствительного детектора соответствует задачам поиска и исследования сверхбыстрой переменности.

Реализация метода аналогового кодирования центроидов электронных лавин позволила использовать КЧД с 16-элементным коллектором в его стандартной конфигурации с уже существующей системой регистрации данных при наблюдениях на 6-м телескопе. Полученные результаты продемонстрировали высокую работоспособность этого детектора и перспективность его использования при исследовании быстропеременных объектов. Разработанные и отлаженные электронные компоненты могут быть использованы для создания ФПУ с КЧД других типов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят коллег, принимавших участие в создании детекторов на новых принципах.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания CAO РАН в части «Проведение фундаментальных исследований», а также Федеральной программы повышения конкурентоспособности Казанского (Приволжского) Федерального университета. Она была поддержана грантами РФФИ Nos. 04-02-17555, 06-02-08313 и 09-02-12053), INTAS (04-78-7366) и CRDF (№ RP1-2394-MO-02). Работа частично поддержана European Structural and Investment Fund and the Czech Ministry of Education, Youth and Sports (Project CoGraDS—CZ.02.1.01/0.0/0.0/15 003/0000437). Наблюдения на телескопах CAO РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение №05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

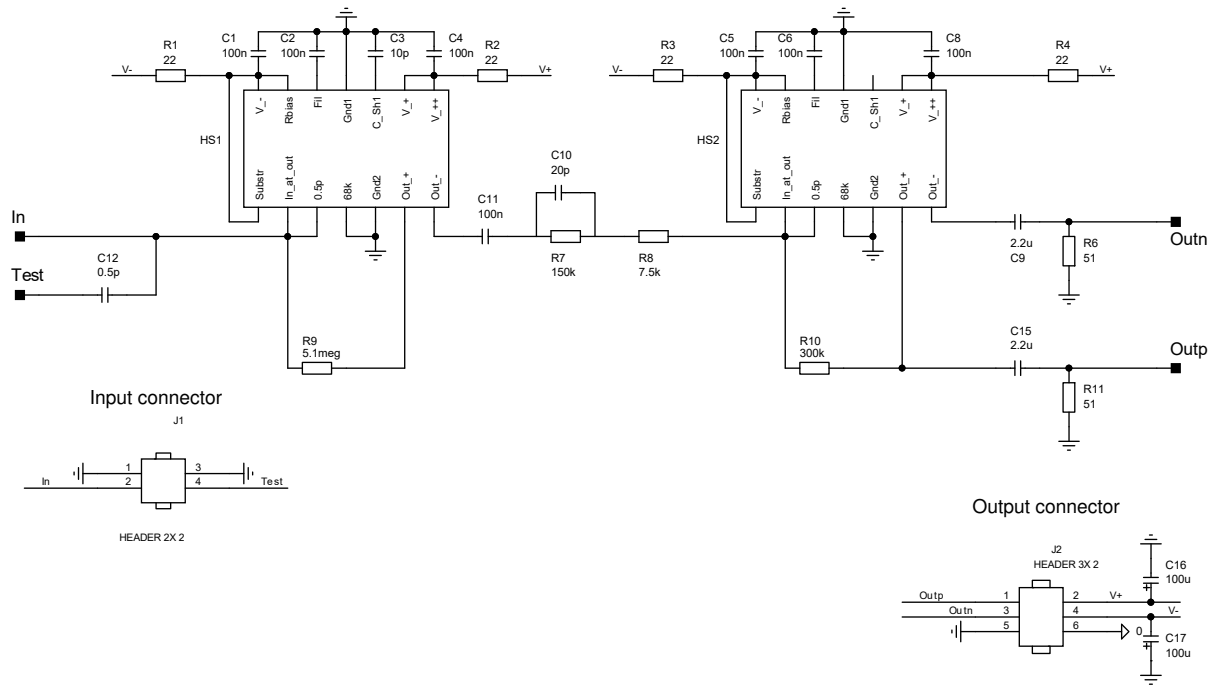
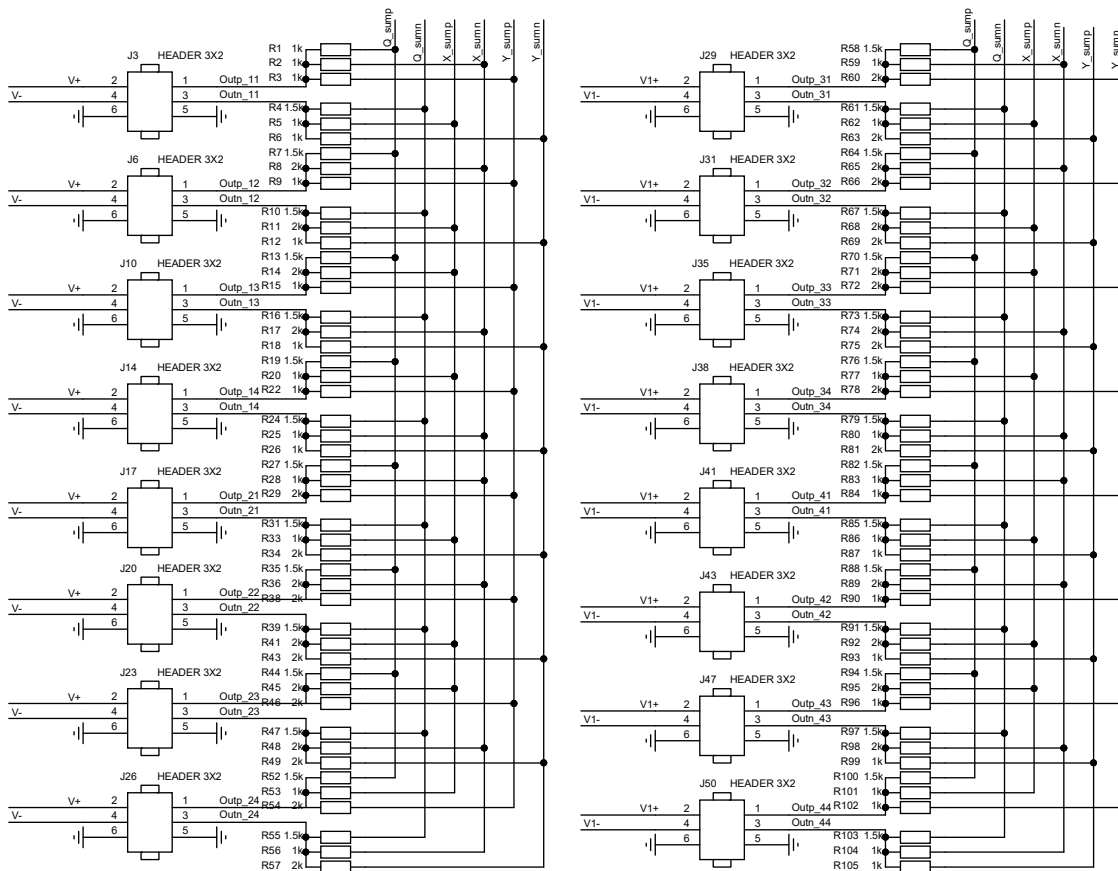


Рис. А.1. Схема зарядочувствительных усилителей.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приводятся схема зарядочувствительного усилителя и схема получения суммарных сигналов для вычисления координаты  $X$ . Для координаты  $Y$  схема аналогична.



**Рис. А.2.** Реальное исполнение схемы аналогового кодирования сигналов для координаты  $X$  на плате. HEADLER  $3 \times 2$  — гнезда для включения ЗЧУ, где  $1$  — положительный выход,  $3$  — отрицательный,  $X_{\text{sump}}$  — прямой сигнал для операционного усилителя  $M_x$ ,  $X_{\text{summ}}$  — инверсный. Так же и для  $M_y$  (см. рис. 3).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. R. Aibund, L. S. Gorn, M. A. Gruntman, et al., *Pribory i tekhnika eksperimenta* **1** (1), 70 (1984).
2. F. Ambrosino, A. Papitto, L. Stella, et al., *Nature Astronomy* **1**, 854 (2017).
3. H. O. Anger, *Review of Scientific Instruments* **29** (1), 27 (1958).
4. G. Beskin, V. de-Bur, S. Karpov, et al., *SPIE Conf. Ser.*, **7021**, 702120 (2008).
5. G. M. Beskin, V. G. Debur, and V. L. Plokhotnichenko, *Physics of Neutron Stars, St. Petersburg, May 25–26, 1999*, 1 (1999).
6. V. de-Bur, A. Terekhov, S. Kosolobov, et al., *AIP Conf. Ser.* **984**, 186 (2008).
7. V. Debur, T. Arkhipova, G. Beskin, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **513** (1-2), 127 (2003).
8. V. Debur and A. Solin, *SAO RAS Technical Report No. 288*, 1 (2002). [in Russian]
9. V. G. Debur, G. M. Beskin, S. V. Karpov, et al., *Astrophysical Bulletin* **64** (4), 386 (2009).
10. O. Dvornikov, *Komponenty i tekhnologii* **8**, 184 (2005).
11. O. Dvornikov, V. Chekhovsky, and A. Solin, *Chip news* **11–12**, 28 (1997). [in Russian]
12. S. S. Eikenberry, G. G. Fazio, and S. M. Ransom, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **108**, 939 (1996).
13. M. A. Gruntman, *Pribory i tekhnika eksperimenta* **1** (1), 14 (1984).
14. D. R. Harbeck, T. Boroson, M. Lesser, et al., *SPIE Conf. Ser.* **9147**, 91470P (2014).
15. W. A. Hiltner, *Astronomical techniques* (1962).
16. M. A. C. Perryman, F. Favata, A. Peacock, et al., *Astron. and Astrophys.* **346**, L30 (1999).
17. D. Phelan, O. Ryan, and A. Shearer, *High Time Resolution Astrophysics*, vol. 351 (2008).
18. V. Plokhotnichenko, G. Beskin, V. Debur, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **513** (1-2), 167 (2003).
19. V. Plokhotnichenko, G. Beskin, S. Karpov, et al., *Advances in Astronomy* **2010**, 109681 (2010).
20. V. L. Plokhotnichenko, G. M. Beskin, S. V. Karpov, et al., *Astrophysical Bulletin*, 2020 (in press).
21. V. L. Plokhotnichenko, G. M. Beskin, V. G. de Bur, et al., *Astrophysical Bulletin* **64** (3), 308 (2009a).
22. V. L. Plokhotnichenko, G. M. Beskin, V. G. de Bur, et al., *Astrophysical Bulletin* **64** (3), 308 (2009b).

23. V. L. Plokhotnichenko, G. M. Beskin, V. G. de Bur, et al., *Astrophysical Bulletin* **64** (3), 308 (2009c).
24. V. L. Plokhotnichenko, G. M. Beskin, and V. G. Debur, *Astrofizika na rubezhe vekov, Pushchino, May 17–22, 1999*, 1 (1999).
25. V. L. Plokhotnichenko, V. G. de Bur, S. V. Moiseev, et al., SAO RAS Technical Report No. 337, 1 (2018). [in Russian]
26. R. W. Romani, A. J. Miller, B. Cabrera, et al., *Astrophys. J.* **563** (1), 221 (2001).
27. A. Shearer, J. Cunniffe, B. Voisin, et al., *AIP Conf. Ser.* **984**, 225 (2008).
28. Y. A. Shibanov, G. M. Beskin, S. V. Karpov, et al., *Journal of Physics Conf. Ser.* **932**, 012027 (2017).

## Photosensor Device Based on a 16-Electrode Position-Sensitive Detector with High Temporal Resolution

V. L. Plokhotnichenko<sup>1</sup>, G. M. Beskin<sup>1,2</sup>, S. V. Karpov<sup>1,2,3</sup>, A. V. Solin<sup>4</sup>, A. A. Solin<sup>4</sup>, A. S. Terekhov<sup>5</sup>, S. N. Kosolobov<sup>5</sup>, G. E. Shaibler<sup>5</sup>, V. G. de Bur<sup>6</sup>, S. V. Moiseev<sup>1</sup>, V. V. Pavlova<sup>1</sup>, and S. S. Moiseev<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

<sup>2</sup>Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, 420008 Russia

<sup>3</sup>CEICO, Institute of Physics, Czech Academy of Sciences, Prague, 18221 Czech Republic

<sup>4</sup>Institute for Nuclear Problems, Belarussian State University, Minsk, 220030 Belarus

<sup>5</sup>Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia

<sup>6</sup>Ioffe Physical-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 194021 Russia

<sup>7</sup>Moiseev Individual Enterprise, Taganrog, 347900 Russia

We report the development of a photodetector based on a position-sensitive detector with a Ga-AS cathode and a 16-element anode. In the case of asymmetric heterostatic circuit (electrodes combined in fours) its working field was limited by 10 mm (for a 18-mm photocathode). Implementing a scheme of analog coding of the coordinates of the centroids of electron avalanches arriving to the anode in the photodetector device made it possible to increase the field size to 14 mm and achieve a spatial resolution of 50  $\mu\text{m}$ . The resulting photodetector device is used as the principal component of a multimode field photopolarimeter in observations with a microsecond time resolution on the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences. We report some of the results obtained in the process of this work.

Keywords: *techniques: photometric—techniques: spectroscopic—techniques: polarimetric*